

## Argamassas de cal hidráulica natural e pozolanas artificiais: avaliação laboratorial



Paulina Faria  
FCT – Universidade Nova  
de Lisboa  
Portugal  
paulina.faria@fct.unl.pt



Vitor Silva  
FCT - Universidade Nova  
de Lisboa  
Portugal  
vmd.silva@fct.unl.pt



Inês Flores-Colen  
IST - Universidade  
Técnica de Lisboa  
Portugal  
ines@civil.ist.utl.pt

**Resumo:** A nova versão da norma das cais de construção apresenta uma nova classificação das cais com comportamento hidráulico, que obriga à reclassificação ou reformulação de muitas cais anteriormente classificadas como naturais.

Apresenta-se a caracterização e discutem-se os resultados - em termos de módulo de elasticidade dinâmico, resistências à flexão e à compressão, absorção de água por capilaridade, secagem e resistência à ação de sulfatos - de argamassas de cal NHL5 produzida em Portugal, sujeitas a curas distintas e em que percentagens da massa de cal hidráulica foram substituídas por pozolanas artificiais existentes no mercado nacional.

**Palavras-chave:** cal hidráulica natural NHL5, pozolanas artificiais, argamassas, caracterização laboratorial.

### 1. INTRODUÇÃO

A nova versão da norma NP EN 459-1: 2011 [1], que resulta da EN 459-1: 2010, está actualmente em fase de transição mas entrará em vigor a partir de Julho de 2012. Esta norma redefiniu as diferentes cais com propriedades hidráulicas e, entre elas, as cais hidráulicas naturais.

Portugal é um dos poucos países do mundo que produz cais hidráulicas naturais. A nova norma limitou e tornou mais rigorosa a constituição das cais hidráulicas naturais, que não podem ter adições. Deste facto resulta que algumas cais hidráulicas antigamente classificadas como naturais mudaram (ou mudarão) de classificação ao serem avaliadas segundo a nova norma. Assim, muitas cais que, de acordo com a versão anterior da norma, eram classificadas como cais hidráulicas naturais, são actualmente classificadas como cais hidráulicas (HL) ou como cais formuladas (FL). Esta situação obrigou alguns fabricantes, que pretendem continuar a disponibilizar no mercado cais hidráulicas naturais (NHL), a formularem novas cais, em termos de constituintes e processo de fabrico, resultando produtos que podem ser substancialmente diferentes – e, espera-se, melhores,

em termos de características diferenciadas de outros ligantes e em constância de qualidade - dos antigamente produzidos sob a mesma designação.

Todas estas denominações de cais (NHL, HL e FL) englobam as, designadas na nova norma, cais com propriedades hidráulicas.

As cais hidráulicas naturais são classificadas como NHL2, NHL3,5 e NHL5. O número junto ao tipo de cal hidráulica define a classe de resistência à compressão (em MPa) aos 28 dias. Do que se tem conhecimento, são fabricadas em Portugal cais hidráulicas naturais NHL3,5 e NHL5, nomeadamente na fábrica da Maceira do grupo Secil. Não se obteve resposta à solicitação de informação sobre a produção de cais hidráulicas naturais segundo a nova norma ao inquirir a outra fábrica nacional, do grupo Cimpor.

As cais hidráulicas naturais diferem das cais aéreas por endurecerem por contacto com a água e terem a capacidade de efectuar esse endurecimento mesmo em imersão em água; no caso das cais aéreas não há endurecimento se não existir contacto com o dióxido de carbono e por isso ele não ocorre em imersão em água e inicia-se muito lentamente em ambientes muito húmidos.

A existência de “impurezas” argilosas na rocha calcária, matéria-prima das cais hidráulicas naturais, nomeadamente de sílica e de alumina, dá origem e justifica esta diferenciação. Ainda mais que na produção de cimento, a produção de cal hidráulica natural depende da natureza e da mineralogia da rocha calcária (daí não ser produzida em muitos países), das condições de cozedura e do tipo de forno utilizado. Normalmente não é possível controlar rigorosamente a temperatura num forno de cal devido a variações na localização do material, face à distância ao queimador ou à periferia do forno. A temperatura varia também com o tipo de combustível utilizado e o material a ser calcinado (com a sua composição química e mineralógica e com a dimensão das partículas) [2].

A reacção entre o hidróxido de cálcio com a sílica e a alumina conduz à formação de silicatos e aluminatos de cálcio hidratados [3]. Estas fases hidratadas (sua quantidade e tipo) condicionam as propriedades da cal hidráulica [4] e, como referido, diferenciam-na dos cimentos Portland e das cais aéreas.

A cal hidráulica natural é produzida actualmente em Portugal a temperaturas inferiores a 900°C - temperaturas semelhantes às utilizadas para a produção de cal aérea. Para a produção de cimento, a rocha calcária possui (no caso das margas) ou são-lhe adicionadas argilas e a calcinação ocorre a temperaturas de quase o dobro, formando-se clínquer no processo de sinterização. Para além da calcinação, também a moagem do clínquer do cimento é muito mais consumidora de energia que a da cal hidráulica.

A cal hidráulica natural constitui assim um ligante hidráulico mais sustentável comparativamente ao cimento mas é também potencialmente mais compatível com as características dos suportes antigos onde venha a ser aplicado.

As pozolanas para argamassas começam a ser objecto de normalização em Portugal [5]. A sua utilização tem vindo a ser reconhecida como promovendo melhorias técnicas, económicas e ambientais. Nomeadamente em argamassas de cal aérea, a adição de pozolanas pode conferir características hidráulicas a essas argamassas [6], possibilitando a sua utilização em situações em que se pretendam endurecimentos rápidos em ambientes com elevada humidade relativa ou com fraco contacto com o dióxido de carbono, indispensável para a carbonatação do hidróxido de cálcio da cal aérea.

Simultaneamente, a imposição da utilização de argamassas de ligante mineral e pozolanas começa a surgir em Cadernos de Encargos de obras. A substituição parcial do ligante de argamassas por pozolanas artificiais pode resultar, assim, também em argamassas mais sustentáveis. Devido à sua procura, surgem no mercado pozolanas artificiais de diversos tipos.

Vários trabalhos têm vindo a ser desenvolvidos relativamente à caracterização de argamassas de cal aérea ou de cimento com pozolanas mas são poucos os que existem relativos à utilização de pozolanas em argamassas de cal hidráulica natural e, que se tenha conhecimento, são ainda inexistentes aqueles utilizando cais hidráulicas naturais portuguesas classificadas de acordo com a nova versão da norma.

No Caderno de Encargos da obra de reabilitação de uma ponte de alvenaria encontrou-se prescrito o uso de argamassa “à base de cal hidráulica e pozolana, isenta de produtos cimentícios” para preenchimento de juntas. Era ainda prescrito que o “produto deverá ser fornecido em sacos, pré-doseado”. Como requisitos eram apresentadas as gamas de valores recomendadas por Veiga [7] para algumas propriedades de argamassas de juntas em estruturas de alvenaria aos 90 dias, embora no Caderno de Encargos não fosse especificada a idade dos ensaios.

Na tentativa de poder fornecer dados concretos que pudessem vir a apoiar a sociedade – nomeadamente os produtores, os prescritores e as empresas de construção que possam vir a executar as obras de reabilitação, ampliar os conhecimentos a transmitir na formação de futuros engenheiros e ainda no âmbito dos projetos de investigação METACAL (PTDC/ECM/100431/2008) e LIMECONTECH (PTDC/ECM/100234/2008) -, iniciou-se uma linha de investigação na área das argamassas de cal hidráulica e pozolanas.

Não se tinha conhecimento das características de argamassas de cal hidráulica natural de fabrico recente (classificada de acordo com a nova norma), da influência das condições de cura neste tipo de cal e dos eventuais benefícios (e desvantagens) que a adição de pozolanas pudesse ter neste tipo de argamassas. Iniciou-se assim o estudo pela produção e caracterização - em termos de módulo de elasticidade, resistências à flexão e à compressão, absorção de água por capilaridade, secagem e resistência à ação de sulfatos - de uma argamassa de cal hidráulica natural NHL5 de fabrico nacional ao traço volumétrico 1:4 e de argamassas semelhantes mas em que determinadas percentagens da massa da cal foram substituídas por iguais massas de três diferentes pozolanas existentes no mercado nacional. Estas argamassas foram ainda sujeitas a condições de cura distintas (que variaram entre 65% de humidade relativa (HR) e 95% de HR, à temperatura de 20°C) para avaliar a influência deste aspecto nas características das argamassas. É esta etapa do estudo (que continua em curso) que se pretende aqui apresentar e discutir.

## **2. MATERIAIS UTILIZADOS E PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS**

Na produção dos provetes de argamassa utilizou-se como ligante corrente a cal hidráulica natural Martingança NHL5, classificada já de acordo com a nova versão da norma NP EN 459-1:2011 [1] e como pozolanas artificiais utilizaram-se duas pozolanas comercializadas pelo Grupo Lagoa – as pozolanas ECOPOZZ 2 (EP, pó cinza) e MTK\_B2 (Mk - pó ligeiramente salmão, indiciando tratar-se de um metacaulino) – e o “aditivo pozolânico” comercializado pela Fradical (PF - pó cor de tijolo). De referir que os valores pelos quais as pozolanas eram, à data, comercializadas variavam entre 60, 150 e 625 euros por 1000 kg (valores substancialmente distintos). Como agregado utilizou-se uma areia que iria ser utilizada em obra de reabilitação de ponte de alvenaria. Todos os materiais foram obtidos em Junho de 2011. Apresenta-se na Tabela 1 a caracterização dos materiais, obtida dos respectivos fabricantes ou de trabalhos onde pozolanas identificadas pelo mesmo nome e do mesmo fabricante foram utilizadas - excepto no caso da baridade, que foi determinada no âmbito desta campanha experimental, com base na NP EN 1097-3:2002 [8]; na Figura

1 apresenta-se a curva granulométrica da areia utilizada, determinada de acordo com a NP EN 933-1:2000 [9].

Tabela 1 – Caracterização dos constituintes das argamassas

Material	Bar. (g/cm <sup>3</sup> )	SO <sub>3</sub> (%)	Ca(OH) <sub>2</sub> (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	CaO (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	K <sub>2</sub> O (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)
NHL5	0,82	≤2	≥15								
Adit.Poz. Fradical	0,73			>55	>40						
Ecopozz 2	0,85			72±3	18±2	3±0,5	2±1				
MTK_B2 [10,11]	0,50			52-60	45-32	nd- 0,2	0,01- 0,04	0,5- 1,3	0,2- 2,8	1,4- 0,4	0,1- 2,8
Areia	1,45										

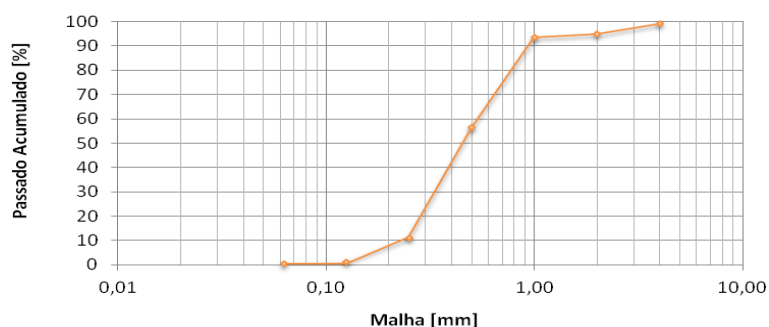


Figura 1 – Curva granulométrica da areia

Para a execução das argamassas, os constituintes secos foram homogeneizados manualmente e depois a quantidade de água foi adicionada durante os primeiros segundos de amassadura em misturadora mecânica. O período de tempo de amassadura cumpriu o definido na EN 1015-2:1998/A1:2006 [12]. Realizou-se o ensaio de consistência por espalhamento com as argamassas frescas e procedeu-se à realização de provetes prismáticos em moldes metálicos de 40 x 40 x 160 (mm). A compactação das argamassas nos moldes foi sempre mecânica, realizada através de 20 pancadas em cada uma das duas camadas com que os moldes foram preenchidos.

Após moldagem, os provetes foram colocados à temperatura de  $23 \pm 3^{\circ}\text{C}$  em três condições de cura distintas em termos de humidade relativa (HR), denominadas como curas de referência R, segundo a norma S (*standard*) [13] e húmida H. Todos permaneceram dois dias dentro dos respectivos moldes, dentro de saco de polietileno fechado, ao fim dos quais foram desmoldados. Os provetes na cura R foram então colocados a  $65 \pm 5\%$  de humidade relativa (HR), os provetes na cura S ficaram outros 5 dias ainda dentro do saco de polietileno, após os quais foram colocados a  $65 \pm 5\%$  de HR e os provetes H foram logo colocados a  $95 \pm 5\%$  de HR. Permaneceram nessas condições de cura até à data de ensaio, aos 28 dias de idade; apenas os provetes H foram colocados a 65% de HR, junto dos restantes, 24 horas antes da data de ensaio. Os provetes submetidos aos ensaios de absorção capilar e secagem aos 28 dias permaneceram posteriormente em

cura a 65% HR e temperatura de  $23 \pm 3^{\circ}\text{C}$  até aos 180 dias, idade a que foram ensaiados à resistência à ação de sulfatos.

As argamassas produzidas encontram-se especificadas na Tabela 2, com a respectiva designação, tipo e maior ou menor (“high” ou “low”) teor de pozolana, traços volumétrico e ponderal, relação água/ligante e consistência por espalhamento. Os provetes de cada argamassa foram colocados em cada uma das condições de cura S, R e H; à designação das argamassas da Tabela 2 acresceu a sigla correspondente à cura.

Considerando como ligante o conjunto da cal e da pozolana, o traço volumétrico de 1:4 e a relação água/ligante foram mantidos sem grande variação. A relação água/cal (excluindo a percentagem de substituição por pozolana) já apresenta obviamente um ligeiro acréscimo nas argamassas com substituição crescente de cal por pozolana. Considerando o ligante o conjunto da cal com a pozolana, os traços são da ordem de 1:7 a 1:7,5; os traços ponderais com a cal diferenciada da pozolana apresentam a percentagem da pozolana introduzida nas argamassas face à massa da cal.

Tabela 2 – Designação, tipo de pozolana, traços, relação água/ligante e consistência por espalhamento das argamassas

Argamassa	Teor e tipo Pozolana	Traço volumét.	Traço ponderal		Relação Água/Ligante			Consist.
		[Cal+Poz:Ar]	[Cal+Poz:Ar]	[Cal:Poz:Ar]	[A/Cal+Poz]	[A/Cal]	[A/Poz]	
NHL	-	1:4	1:7,1	1:0:7	1,6	7	-	140
NHL_IPF	low PF	1:4	1:7,2	1:0,1:8	1,6	8	16	146
NHL_hPF	high PF	1:4	1:7,3	1:0,2:9	1,6	9	9	130
NHL_IEP	low EP	1:4	1:7,1	1:0,1:8	1,6	8	14	137
NHL_hEP	high EP	1:4	1:7,1	1:0,3:9	1,6	9	8	141
NHL_IMK	low MK	1:4	1:7,4	1:0,1:8	1,7	8	23	146
NHL_hMK	high MK	1:4	1:7,7	1:0,2:9	1,7	9	13	149

### 3. CAMPANHA EXPERIMENTAL E RESULTADOS

Todas as argamassas foram produzidas com pequena variação de constituintes, incluindo de água, alterando apenas a percentagem volumétrica de pozolana por substituição de igual massa da cal hidráulica natural e o tipo de pozolana. Em todos os casos obtiveram-se argamassas com trabalhabilidade considerada adequada para aplicação em obra. No entanto, ficou-se com a sensação que uma amassadura mais prolongada poderia ter sido benéfica para as argamassas, no sentido de eventualmente se poder proporcionar melhor ligação entre os constituintes.

A consistência por espalhamento das argamassas frescas, realizada de acordo com a EN 1015-3: 1999/A1:2004/A2:2006 [14] - embora com equipamento que só está de acordo com versão da norma que não é a última e que regista valores da ordem dos 10% abaixo dos valores em equipamento normalizado -, pode ser observada na Tabela 2. Obteve-se um valor médio de  $141 \pm 7$  mm.

Determinaram-se o módulo de elasticidade dinâmico, as resistências à tração por flexão e à compressão, a porosidade aberta, a absorção por capilaridade, a secagem e, a idade mais avançada, a resistência ao ataque por sulfatos.

O **módulo de elasticidade dinâmico** ( $E_d$ ) foi determinado através da frequência de ressonância fundamental, a partir de um equipamento Zeus ZRM e de acordo com a norma NP EN 14146:2006 [15].

A **resistência à tração por flexão** ( $R_t$ ) foi determinada de acordo com a EN 1015-11:1999 [13]; a determinação da **resistência à compressão** ( $R_c$ ) seguiu a mesma norma e foi realizada sobre uma metade de cada provete ensaiado à tração.

A **porosidade aberta** ( $P_a$ ) foi realizada com uma parte íntegra de cada provete ensaiado mecanicamente, através do método da pesagem hidrostática após imersão em vácuo, com base na norma NP EN 1936:2008 [16].

A **absorção de água por capilaridade** foi determinada em meios provetes que se encontravam com massa constante (variação de massa inferior a 0,1% num intervalo de 24 horas), após secagem em estufa a 60°C. O ensaio efectuou-se com base nas normas EN 15801:2009 [17] e EN 1015-18:2002 [18] mas as faces laterais dos provetes não foram impermeabilizadas. O ensaio realizou-se numa caixa plástica fechada onde tinha sido previamente estabelecido ambiente saturado em humidade relativa, pela evaporação a partir de uma massa de água existente por baixo do tabuleiro onde se colocavam os provetes. Realizaram-se pesagens com intervalos de poucos minutos no início da imersão da base dos provetes em 5 mm de altura de água, e a cada 24 horas, até se atingir a saturação dos provetes (variação de massa inferior a 1% em 24 horas). O ensaio é representado pelo gráfico da Figura 2, com a massa de água absorvida por unidade de área em ordenada e a raiz quadrada do tempo, em minutos, em abcissa. Considerando-se que, em termos médios, o volume dos meios provetes era muito semelhante, o valor máximo de água absorvida por capilaridade por unidade de área é traduzido pelo valor assintótico (VA); o declive do troço inicial do gráfico é o coeficiente de capilaridade (CC), que traduz a velocidade com que ocorre a absorção capilar.

A **secagem** dos provetes foi iniciada imediatamente após o ensaio de capilaridade, com os provetes saturados, com base em especificação de ensaio da RILEM [19] mas sem impermeabilização dos provetes. Decorreu em ambiente de  $65 \pm 5\%$  de HR e temperatura de  $23 \pm 3^\circ\text{C}$ . Os provetes foram pesados periodicamente até à estabilização da sua massa e determinaram-se as curvas de evaporação, que traduzem a variação no tempo do teor em água. O teor em água em cada instante ( $W_t$ ) é obtido pela percentagem ponderal da massa seca, equação (1):

$$W_t = \frac{(m_t - m_0)}{m_0} \times 100 \quad [\%] \quad (1)$$

em que  $m_t$  e  $m_0$  são, respectivamente, a massa do meio provete no instante  $t$  e do meio provete em massa constante, em g.

As curvas de evaporação podem observar-se na Figura 3 e a partir delas determina-se o índice de secagem – no caso utilizando, como método simplificado de integração numérica, a regra do trapézio [20], equação (2).

$$IS = \frac{\sum_{i=1}^n [(t_i - t_{i-1}) \times (W_{i-1} + W_i)]}{Q_{max} \times F_f} \quad (2)$$

em que:  $t_i$  é o tempo de ensaio  $i$ , em horas;  $t_f$  é o tempo final do ensaio, em horas;  $Q_i$  é a quantidade de água no interior do provete no instante  $i$ , em % relativamente à massa seca;  $Q_{max}$  é a quantidade de água inicial, em % relativamente à massa seca.

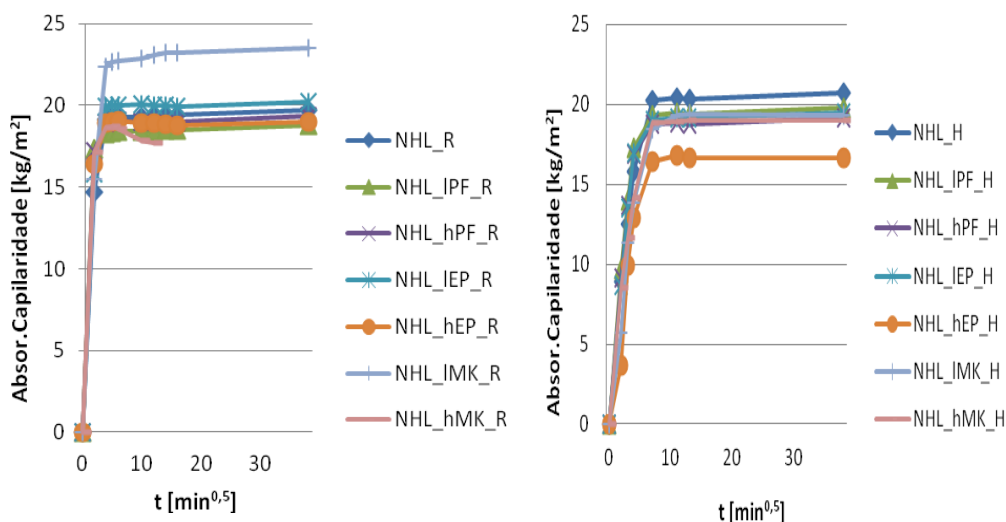


Figura 2 – Absorção de água por capilaridade das argamassas

A **resistência à ação de sulfatos** foi determinada através de ensaio realizado com base na norma para pedra NP EN 12370: 2001 [21], já utilizado previamente em argamassas de cal aérea e pozolanas [22], mas utilizando uma solução apenas com metade da concentração em sulfato de sódio (3% de sulfato de sódio anidro). Os provetes com 180 dias de idade, inicialmente em massa constante após secagem em estufa a 105°C, foram sucessivamente sujeitos a ciclos constituídos por 20 minutos de arrefecimento, pesagem, imersão na solução de sulfatos durante 2 horas, 10 minutos de escorrência e secagem em estufa de novo a 105°C durante um mínimo de 20 horas. Em cada pesagem avaliou-se o estado de integridade do provete e a sua perda de massa, registando-se em gráfico (Figura 4) a percentagem de perda de massa em ordenada e o n° de ciclos em abcissa.

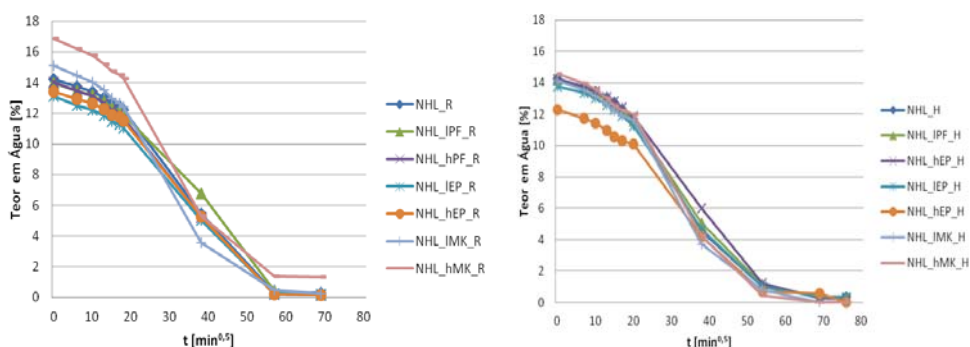


Figura 3 – Curvas de evaporação das argamassas

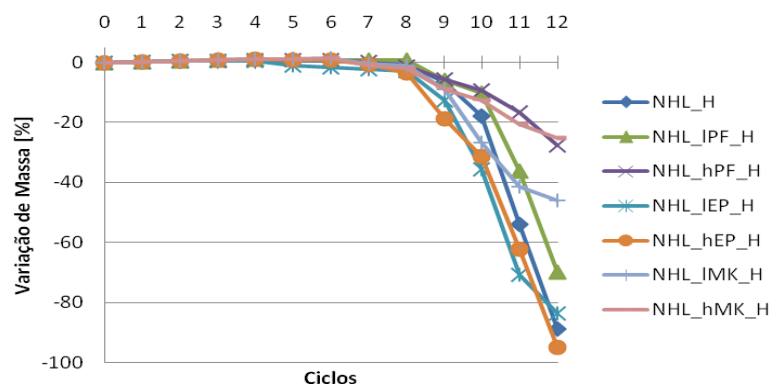


Figura 4 – Variação de massa das argamassas por ação dos sulfatos

Para a caracterização das argamassas endurecidas tomou-se sempre o valor médio de um mínimo de três provetes. Todas as argamassas foram caracterizadas às resistências mecânicas e à resistência face ao ataque por sulfatos mas apenas as argamassas sujeitas às curas H e R e foram objeto de ensaio ao módulo de elasticidade dinâmico, absorção capilar e secagem e, por perdas de massa ocorridas ao longo do ensaio, os resultados de porosidade aberta apenas foram considerados válidos para as argamassas sujeitas à cura H. Os resultados são apresentados na Tabela 3.

#### 4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

El-Turki et al. [23] analisaram a evolução das reacções de pastas de cal hidráulica e verificaram ser distintas em condições de cura de 65% e de 97% de HR. Consideraram que as diferentes características são devidas à reacção de hidratação ser rápida comparativamente à carbonatação e ser maioritariamente condicionada pela temperatura e pela humidade relativa. Dai serem expetáveis diferenças de comportamento das mesmas argamassas mas sujeitas a condições de cura distintas.

Em termos de resistências mecânicas, interessa que estas sejam suficientemente elevadas para aplicação no refechamento de juntas ou em rebocos mas não demasiado para não provocarem o desenvolvimento de tensões que ponham em causa todo o conjunto da alvenaria.

As argamassas com cura S conduziram aos menores valores de resistência à tração (excepto para a argamassa com mais elevado teor na pozolana Mk, em que o valor na cura R foi o menor). Os valores de  $R_t$  das argamassas sujeitas à cura H superaram largamente os das outras curas (valor médio de  $R_t$  das argamassas H de 0,16 MPa, para 0,07 MPa das argamassas R e 0,05 MPa das argamassas S). A tendência manteve-se não só para as argamassas só de cal como também para as argamassas com as diferentes pozolanas. A  $R_t$  decresceu com a utilização de ambas as percentagens de substituição de cal por pozolanas nas curas R e S, sendo esse decréscimo mais evidente com o aumento da substituição. No entanto, na cura H, as argamassas com a maior percentagem de substituição por pozolana EP e a menor percentagem de substituição por pozolana Mk apresentam mesmo ligeiro aumento de  $R_t$  comparativamente à argamassa só de cal na mesma cura.



Tabela 3 – Valor médio (e desvio-padrão) das resistências à tração e à compressão, módulo de elasticidade dinâmico, porosidade aberta, coeficiente de capilaridade, valor assintótico da absorção capilar, índice de secagem e variação de massa ao fim de 12 ciclos de contaminação por sulfatos das argamassas

Argamassa	Rt	Dp	Rc	Dp	Ed	Dp	Pa	Dp	CC	VA	IS	Var. Mas. Sulf. [%]
	[MPa]		[MPa]		[MPa]		[%]		[kg/m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[-]	
NHL_R	0,08	0,00	0,18	0,01	947	7			5,2	20,5	0,30	
NHL_IPF_R	0,07	0,01	0,15	0,00	881	23			6,1	19,5	0,33	
NHL_hPF_R	0,08	0,01	0,15	0,02	931	31			6,1	20,2	0,28	
NHL_IEP_R	0,07	0,00	0,17	0,01	906	41			5,6	20,3	0,29	
NHL_hEP_R	0,06	0,00	0,18	0,01	942	72			5,8	19,6	0,29	
NHL_IMK_R	0,07	0,02	0,19	0,03	739	26			5,5	24,4	0,25	
NHL_hMK_R	0,03	0,00	0,17	0,02	541	18			6,0	18,7	0,30	
NHL_H	0,18	0,01	0,39	0,05	1820	131	26	0	3,2	21,4	0,24	-89
NHL_IPF_H	0,15	0,01	0,40	0,06	1963	68	24	0	3,4	20,4	0,25	-70
NHL_hPF_H	0,14	0,00	0,35	0,01	1729	113	25	0	3,2	20,0	0,26	-28
NHL_IEP_H	0,14	0,02	0,38	0,02	1904	97	24	1	3,1	20,0	0,24	-84
NHL_hEP_H	0,19	0,02	0,51	0,02	2193	85	26	0	3,7	17,8	0,26	-95
NHL_IMK_H	0,19	0,02	0,50	0,02	2275	80	27	0	3,9	20,6	0,27	-46
NHL_hMK_H	0,15	0,01	0,40	0,07	2530	155	27	0	3,0	20,0	0,27	-25
NHL_S	0,07	0,00	0,18	0,01								
NHL_IPF_S	0,06	0,01	0,17	0,02								
NHL_hPF_S	0,04	0,00	0,15	0,01								
NHL_IEP_S	0,06	0,00	0,15	0,04								
NHL_hEP_S	0,04	0,00	0,17	0,03								
NHL_IMK_S	0,05	0,01	0,23	0,01								
NHL_hMK_S	0,05	0,01	0,24	0,02								

A cura R conduziu aos menores valores de resistência à compressão, embora muito aproximados dos da cura S (excepto para as argamassas com pozolana EP em que os valores na cura R foram ligeiramente superiores). Os valores de  $R_c$  das argamassas sujeitas à cura H superaram largamente os das restantes curas (valor médio das argamassas H de 0,42 MPa para 0,19 MPa e 0,17 MPa, respetivamente das argamassas S e R). Tal como ocorrido com a  $R_c$ , a tendência manteve-se não só para as argamassas só de cal como também para as argamassas com as diferentes pozolanas. Na cura R as argamassas com as pozolanas EP e Mk apresentaram valores da mesma ordem de grandeza da argamassa só de cal, enquanto na cura S as argamassas com pozolana Mk superaram a  $R_c$  registada pela argamassa só de cal. No entanto, na cura H as argamassas

com a maior percentagem de substituição de cal por pozolana EP e a menor por pozolana Mk registaram os valores mais elevados, da ordem dos 0,5 MPa, acima do limite inferior de 0,4 MPa definido por Veiga et al. [7] para argamassas para rebocos interiores e exteriores aos 90 dias e perto do limite inferior de 0,60 MPa definido pelas mesmas autoras, e também aos 90 dias, para argamassas para o refechamento de juntas. As restantes argamassas nessa cura registaram valores de  $R_c$  semelhantes aos da argamassa só de cal.

Em termos do módulo de elasticidade dinâmico e à semelhança do ocorrido com as  $R_t$  e  $R_c$ , os valores registados pelas argamassas na cura H foram muito superiores aos registados pelas argamassas na cura R (com valores médios de 2050 MPa para 841 MPa). Embora também relativamente a esta característica as argamassas com as pozolanas EP e Mk apresentem valores de  $E_d$  ligeiramente superiores aos das argamassas só de cal, o incremento parece não ser muito elevado, denotando a manutenção de alguma deformabilidade das argamassas.

A porosidade aberta  $P_a$  só foi registada para as argamassas na cura H. Parece existir uma tendência para a diminuição da  $P_a$  com a substituição da cal pela pozolana PF e EP mas um ligeiro aumento com a Mk. No entanto, este ligeiro aumento não se refletiu nas resistências antes analisadas.

Em termos de comportamento face à água interessa que o coeficiente de capilaridade CC seja o menor possível, para que a velocidade a que ocorre a absorção capilar seja reduzida. Verifica-se que as argamassas na cura H apresentaram menor CC que as na cura R, o que se traduz positivamente. Ainda enquanto na cura R existiu um ligeiro aumento do CC com a substituição da cal por pozolana e especialmente quando em maior quantidade, na cura H chegou a registar-se uma ligeira diminuição do CC com percentagens de substituição de algumas pozolanas (menor percentagem de EP e maior de Mk). Interessa também que o valor total de água absorvida por capilaridade (VA) seja o menor possível mas a este nível, praticamente todas as argamassas registaram valores muito semelhantes. No entanto, e excepto no caso da argamassa na cura R com menor percentagem de Mk, todas as argamassas apresentaram valor inferior ao registado pela respetiva argamassa só de cal, o que se destaca como positivo.

Menores índices de secagem IS indiciam argamassas com maior facilidade de secagem e a este nível também as argamassas sujeitas a cura H surgiram como mais positivas, com valores médios de 0,25 comparativamente a 0,29 das argamassas na cura R. No entanto, enquanto a substituição por algumas pozolanas denota uma diminuição do IS da argamassa R, na cura H ocorre um ligeiro aumento de IS com essa substituição, principalmente com a pozolana Mk. Mas a influência da cura indicia ser mais forte que a relativa à substituição por pozolanas.

Menores perdas de massa por acção dos sulfatos indiciam melhor comportamento das argamassas quando aplicadas em meios contaminados com estes sais. Os provetes das argamassas S ficaram totalmente destruídos ao fim de 30 minutos da 1ª imersão na solução de sulfatos e a maioria dos provetes das argamassas R destruíram-se ao ser manuseados ao fim das 2h da 1ª imersão em sulfatos. No entanto, as argamassas H mantiveram-se sem perdas de massa até aos 8 ciclos de ensaio e a partir daí registaram perdas graduais. Enquanto as argamassas com pozolana EP e só de cal aos 12 ciclos já registavam perdas de massa perto dos 100%, as com pozolana PF apresentavam perdas intermédias entre os 50-70% mas as argamassas com pozolana Mk só registavam perdas de cerca de 25% da massa, denotando um bom comportamento face a esta ação tão agressiva.

## 5. CONCLUSÕES

Do exposto verifica-se que as condições de cura laboratoriais de argamassas de cal hidráulica natural NHL5 condicionam em larga medida as características obtidas. Daí que se admita que também em aplicações em obra, as condições de cura proporcionadas serão fulcrais para o bom desempenho das argamassas. Assim, a molhagem/secagem de uma argamassa de cal hidráulica natural aplicada numa alvenaria pode ter influência primordial nas reacções ocorridas. Para além da especificação do tipo e dosagem de argamassa deverá ser especificada para obra a necessidade de proteger as argamassas frescas com, por exemplo, feltros geotêxteis, mantidos húmidos para garantir condições de elevada HR. Outra alternativa poderá ser a aspersão regular e periódica com água [24]. Recomendam-se estes cuidados durante um mínimo de duas semanas. A ausência de manutenção de HR elevada pode conduzir à não obtenção do desempenho pretendido.

Para a maior parte das características analisadas, essas condições de cura revelam-se como tendo mais influência que a utilização (ou não) de pozolanas. No entanto, a substituição parcial de percentagens de cal por determinadas pozolanas, tais como o metacaulino, pode ser benéfica a nível ambiental e também potenciar algumas das características das argamassas, e muito particularmente a resistência à ação agressiva de sulfatos.

Finalmente, comparativamente a outros estudos que utilizaram procedimentos de ensaio semelhantes [25] mas uma cal hidráulica NHL5 produzida pelo mesmo fabricante mas classificada de acordo com a norma antiga, a cal hidráulica natural NHL5 utilizada no presente estudo, e classificada de acordo com a nova norma, parece indiciar um comportamento claramente melhorado relativamente à que antes era comercializada com a mesma designação.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IPQ. *Cal de construção. Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade*. NP EN 459-1: 2011.
- [2] Ball R., El-Turki A., Allen G. *Influence of carbonation on the load dependent deformation of hydraulic lime mortars*. Materials Science and Engineering A 528 (2011) 3193-3199 (doi:10.1016/j.msea.2010.12.070).
- [3] Lanas J., Pérez-Bernal J., Bello, M., Alvarez-Galindo J. *Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars*. Cement and Concrete Research 34 (2004), 2191-2201 (doi:10.1016/j.cemconres.2004.02.005).
- [4] Mertens G., Madau P., Durinck D., Blonpain B., Elsen J. *Quantitative mineralogical analysis of hydraulic limes by X-ray diffraction*. Cement and Concrete research 37 (2007) 1524-1530 (doi:10.1016/j.cemconres.2007.08.002).
- [5] IPQ. *Pozolanas para betão, argamassas e Caldas. Definições, requisitos e verificação da conformidade*. NP 4220: 2010.
- [6] Charola E., Faria-Rodrigues P., McGhie, A., Henriques F. *Pozzolanic components in lime mortars: correlating behaviour, composition and microstructure*. Restoration of Buildings and Monuments.11 (2) (2005) 111-118.
- [7] Veiga R., Fragata A., Velosa A., Magalhães A., Margalha G., *Lime-based mortars: viability for use as substitution renders in historical buildings*. International Journal of Architectural Heritage 4 (2) (2010) 177-195.

- [8] IPQ. *Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 3: Determinação da baridade e volume de vazios*. NP EN 1097-3:2002.
- [9] IPQ. *Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração*. NP EN 933-1:2000.
- [10] Velosa, A., Rocha, F., Veiga, R., *Influence of chemical and mineralogical composition of metakaolin on mortar characteristics*. Acta Geodyn. Geomater 6, 1 (153) (2009), 121-126.
- [11] Gomes, A., *Revestimentos com fibras para reabilitação*. Dissertação para obtenção do grau de mestre em engenharia civil, Universidade de Aveiro, 2010.
- [12] CEN. *Methods of test for mortars for masonry. Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars*. EN 1015-2: 1998/A1: 2006.
- [13] CEN. *Methods of test for mortars for masonry. Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*. EN 1015-11: 1999/A1: 2006.
- [14] CEN. *Methods of test for mortars for masonry. Part 3: Determination of consistency of fresh mortars*. EN 1015-3: 1999/A1:2004/A2:2006.
- [15] IPQ. *Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico (através da medição da frequência de ressonância fundamental)*. NP EN 14146:2006.
- [16] IPQ. *Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta*. NP EN 1936: 2008.
- [17] CEN. *Conservation of cultural property. Test methods. Determination of water absorption by capillarity*. EN 15801: 2009.
- [18] CEN. *Methods of test for mortars for masonry. Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar*. EN 1015-18: 2002.
- [19] RILEM TC 25-PEM. *Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods. Test nº II.5 – Evaporation curve*. Materials & Structures 13 (1980), 204-207.
- [20] Brito V., Gonçalves T., Faria P. *Coatings applied on damp substrates: performance and influence on moisture transport*. J. Coating Technology and Research, Vol.8, Issue 4 (2011), 513-525 (doi: 10.1007/s11998-010-9319-5).
- [21] IPQ. *Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação da resistência à cristalização de sais*. NP EN 12370: 2001.
- [22] Faria-Rodrigues P. *Resistance to salts of lime and pozzolan mortars*. In RILEM Proceedings pro 067 - Repair Mortars for Historic Masonry, C.Groot, Ed., RILEM Publications on-line, 2009, p.99-110 (E-ISBN: 978-2-35158-083-7).
- [23] El-Turki A., Ball R., Allen G. *The influence of relative humidity on structural and chemical changes during carbonation of hydraulic lime*. Cement and Concrete Research 37 (2007) 1233-1240 (doi:10/1016/j.cemconres.2007.05.002).
- [24] El-Turki A., Ball R., Holmes S., Allen W., Allen G. *Environmental cycling and laboratorial testing to evaluate the significance of moisture control for lime mortars*. Construction and Building Materials 24 (2010) 1392-1397.
- [25] Faria-Rodrigues P., Henriques, F., Rato V., *Argamassas correntes: influência do tipo de ligante e do agregado*. In 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC. Lisboa, LNEC, 22-23 Novembro 2007 (CD-rom).